

机电一体化设备节能策略

朱绍品 阮振辉 杨涛 杨学东 陈志宏

云南迪庆有色金属有限责任公司

DOI:10.12238/etd.v6i8.17105

[摘要] 机电一体化设备节能策略聚焦能耗机理,从机械、电气系统及多能域耦合分析能耗组成、关键影响因素,构建全生命周期能效评估体系。策略涵盖机械系统轻量化、高效传动及能量回收;电气系统变频调速、电机能效提升与电源管理优化;智能控制创新采用模型预测、强化学习与数字孪生技术;系统级实施多设备协同、峰谷电价响应及微电网集成。同时,针对不同行业适配应用,分析实施障碍并提出政策激励等建议,展望AI、5G及氢能驱动等未来趋势。

[关键词] 机电一体化; 设备; 节能策略

中图分类号: TH-39 文献标识码: A

Energy-Saving Strategies for Mechatronic Equipment

Shaopin Zhu Zhenhui Ruan Tao Yang Xuedong Yang Zhihong Chen

Yunnan Diqing Nonferrous Metals Co., Ltd.

[Abstract] Energy-saving strategies for mechatronic equipment focus on energy consumption mechanisms, analyzing energy composition and key influencing factors from mechanical and electrical systems as well as multi-energy domain coupling, thereby establishing a full lifecycle energy efficiency evaluation system. The strategies cover lightweight mechanical systems, efficient transmission, and energy recovery; frequency conversion speed regulation, motor efficiency improvement, and power supply management optimization in electrical systems; innovative intelligent control adopting model prediction, reinforcement learning, and digital twin technologies; and system-level implementation including multi-equipment coordination, peak-valley electricity price response, and microgrid integration. Furthermore, the strategies are tailored for application in different industries, with analysis of implementation obstacles and proposals for policy incentives, while also envisioning future trends such as AI, 5G, and hydrogen energy drive.

[Key words] Mechatronics; Equipment; Energy-Saving Strategies

引言

在全球能源需求持续增长与“双碳”目标日益紧迫的背景下,机电一体化设备作为工业生产的核心装备,其能耗问题愈发受到关注。此类设备融合机械、电子、控制等多学科技术,然而运行中普遍存在机械摩擦损耗大、电气系统效率低、动态响应能耗高以及多能域耦合能量利用不充分等问题。探寻有效的节能策略,不仅有助于降低企业运营成本、提升竞争力,更是推动工业绿色转型、实现可持续发展的关键所在。

1 机电一体化设备能耗机理分析

1.1 设备能耗组成与特征

(1)机械系统能耗模型:需综合考虑摩擦损耗、惯性损耗及负载损耗。传动机构中,齿轮啮合摩擦、轴承滚动摩擦产生的能量损耗与转速、负载呈正相关;执行机构在启停、变速过程中,惯性力导致的动能变化会转化为热能损耗,可通过建立多体动

力学模型,结合摩擦系数、转动惯量等参数量化能耗。(2)电气系统能量损耗分析:驱动单元中,逆变器开关损耗、IGBT导通损耗随开关频率和输出电流增大而增加;控制单元的芯片运算、传感器信号采集需持续消耗电能,且在动态调节过程中,电流谐波会加剧铜损,需通过电路仿真模型分离各损耗成分。(3)多能域耦合能量流建模:机械域的动能、势能与电气域的电能、热能存在耦合转换关系,例如电机驱动负载时,电能先转化为机械能,部分机械能又因摩擦转化为热能。需构建跨域能量流模型,明确各域能量传递效率及损耗节点,揭示耦合过程中的能耗规律。

1.2 关键能耗影响因素

(1)负载波动与工况变化的影响:负载突变会导致电机输出功率频繁调整,引发电流冲击,增加铜损和铁损;间歇工况下,设备频繁启停产生的启动电流是额定电流的3-5倍,短时间内能

耗骤增,长期运行会显著提升平均能耗水平。(2)控制策略对动态响应的能耗代价:传统PID控制为追求快速响应,易出现超调,导致能量浪费;先进模型预测控制虽能优化动态过程,但需复杂运算,增加控制单元能耗,需在响应速度与能耗间权衡。(3)设备老化与维护水平的关联性:机械部件老化使摩擦系数增大,能耗上升;电气部件老化导致绝缘性能下降,漏电流增加;定期维护可降低老化速率,例如润滑保养能减少机械摩擦损耗,而维护缺失会使能耗年均上升5%~10%^[1]。

1.3能效评价指标体系

(1)传统指标的局限性:效率仅反映稳态下能量转换效率,无法体现动态能耗特征;功率因数主要针对交流系统,对直流驱动设备适用性差,且两者均未考虑设备启停、待机等非运行状态能耗,难以全面评价设备综合能效。(2)基于全生命周期的能效评估方法:涵盖设备设计、制造、运行、维护、报废全阶段,需量化各阶段能耗,例如设计阶段考虑材料能耗,运行阶段结合动态能耗,维护阶段计入维护过程能耗。通过构建全生命周期能效指数,实现对设备能效的全面、动态评价,为能效优化提供全阶段依据。

2 机电一体化设备节能策略

2.1机械系统节能优化

(1)轻量化设计与材料替代:通过拓扑优化技术简化机械结构冗余部分,结合碳纤维复合材料高强度、低密度特性,降低设备运动惯性。例如在机械臂臂杆设计中,采用碳纤维替代传统钢材,可使部件重量减轻40%~60%,减少驱动系统负载能耗;同时碳纤维的低摩擦系数还能降低传动过程中的摩擦损耗,综合能耗可下降15%~25%。(2)高效传动机构选型:谐波减速器凭借齿面多齿啮合特性,传动效率可达90%~95%,较传统齿轮减速器能耗降低10%~15%,且运行噪音低、维护周期长,适用于高精度设备;磁悬浮轴承通过电磁力实现无接触支撑,消除机械摩擦损耗,使旋转部件能耗降低30%以上,同时避免润滑剂带来的污染与维护成本,在高速电机、涡轮分子泵等设备中应用广泛^[2]。(3)能量回收装置应用:飞轮储能装置可在设备制动或减速时,将动能转化为飞轮旋转动能储存,待设备启动或加速时释放能量,减少电能消耗,在电梯、轨道交通设备中应用可回收30%~40%的制动能量;液压蓄能器通过压缩液压油储存能量,适用于间歇工况设备,如液压机械臂,可降低系统峰值功率需求,减少电机频繁启停能耗,节能率可达20%~30%。

2.2电气系统节能控制

(1)变频调速与软启动技术:变频调速通过调节电源频率改变电机转速,使电机输出功率与负载需求精准匹配,避免“大马拉小车”现象,在风机、水泵类设备中应用可节能25%~50%;软启动技术通过逐步提升电压,避免电机启动时的冲击电流(传统直接启动电流为额定电流5~7倍),降低启动能耗与电气部件损耗,延长电机使用寿命。(2)电机系统能效提升:IE5超高效电机采用新型铁芯材料(如高硅钢片)与优化绕组设计,铁损与铜损较IE4电机降低15%~20%,额定工况下能效可达97%以上;搭配电

机控制器与能效监测模块,实现电机运行状态实时调整,在连续运行设备中,年耗电量较传统IE3电机减少8%~12%,同时降低散热系统能耗。(3)电源管理优化:动态电压调整技术根据设备负载变化,实时调节供电电压,在轻负载工况下降低电压,减少电路损耗,例如在工业计算机中应用可降低电源能耗10%~15%;休眠模式针对设备闲置时段(如夜间停机、工序间隔),关闭非必要模块供电,仅保留核心控制单元低功耗运行,使待机能耗降低80%以上,适用于间歇工作的自动化生产线设备^[3]。

2.3智能控制策略创新

(1)基于模型预测控制(MPC)的动态能量分配:MPC通过建立设备能耗模型与约束条件,预测未来一段时间内的负载需求与能耗变化,优化能量分配方案。例如在多轴机械臂系统中,MPC可协调各轴电机能量分配,避免多轴同时高负载运行导致的能耗叠加,使系统综合能耗降低12%~18%,同时保证运动精度与响应速度。(2)强化学习在工况自适应节能中的应用:通过构建“状态-动作-奖励”机制,让系统自主学习不同工况下的最优节能策略。例如在注塑机中,强化学习算法可根据原料类型、成型参数等工况变化,自动调整注射速度、保压压力等参数,在保证产品质量的前提下,实现能耗动态优化,节能率可达8%~15%,且适应不同生产需求的灵活性显著提升。(3)数字孪生驱动的实时能效监控与优化:构建设备数字孪生模型,通过传感器实时采集物理设备运行数据(如电流、转速、温度),在虚拟空间中模拟设备能耗状态,识别能耗异常节点(如轴承磨损导致的能耗骤增);结合优化算法生成节能方案并下发至物理设备,实现闭环优化,例如在数控机床中应用可使能耗波动控制在±5%以内,异常能耗响应时间缩短至秒级。

2.4系统级能量管理

(1)多设备协同调度算法:针对自动化车间多台设备,通过算法优化生产任务分配与运行时序,避免设备同时高负载运行导致的能源峰值浪费。例如在汽车焊接生产线中,协同调度算法可错开多台焊接机器人的焊接峰值时段,使车间总能耗降低10%~15%,同时减少电网负荷波动。(2)峰谷电价响应策略:结合电网峰谷电价差异,如工业用电峰时电价为谷时3~4倍,调整设备运行计划,将高能耗工序,如热处理、大型加工安排在谷时进行,峰时优先运行低能耗工序或启动储能装置供电。例如在冶金企业中,该策略可使月度电费支出减少20%~30%,同时缓解电网峰时供电压力^[4]。(3)微电网与可再生能源集成方案:构建包含太阳能光伏、风能发电装置与储能系统的微电网,为机电一体化设备提供清洁电能。通过能量管理系统协调可再生能源出力与设备用电需求,在光照充足或风力较大时,优先使用可再生能源供电,剩余电能储存至储能系统;在能源短缺时,结合电网补充供电。例如在智能工厂中,该方案可使设备可再生能源使用率达到30%~40%,年碳排放量降低25%以上。

3 机电一体化设备节能策略的行业应用与推广建议

3.1典型行业适配性分析

(1)汽车制造:焊接生产线中,多台焊接机器人同时运行,

采用“多设备协同调度算法”可错开焊接峰值能耗时段,降低车间总能耗10%-15%;涂装生产线的烘干设备能耗高,结合“峰谷电价响应策略”,将烘干工序安排在谷时进行,月度电费可减少20%以上。同时,焊接机器人机械臂采用“碳纤维复合结构”轻量化设计,能降低驱动能耗,适配汽车制造高精度、高负荷的生产需求。(2)物流装备:AGV设备可应用“能量回收装置”,在制动减速时回收动能,延长续航时间,减少充电频次;自动化立体库的堆垛机采用“IE5超高效电机”与“变频调速技术”,能精准匹配货物搬运负载,避免空载高能耗运行。此外,通过“数字孪生驱动的实时能效监控”,可实时优化AGV路径与立体库运行参数,适配物流行业高频次、高机动性的作业特点。(3)新能源装备:风电设备的主轴系统采用“磁悬浮轴承”,消除机械摩擦损耗,提升发电效率;光伏组件生产线的激光切割设备应用“动态电压调整”技术,在轻负载时降低供电电压,减少能耗。同时,“微电网与可再生能源集成方案”可实现风电、光伏生产设备自身与清洁能源的联动供电,契合新能源行业绿色生产的核心需求。

3.2 实施路径与障碍分析

(1)技术改造成本与投资回报周期:初期需投入资金更换高效部件(如IE5电机、碳纤维结构件)与部署智能控制系统,中小型企业可能面临资金压力。以汽车制造企业为例,全车间节能改造需数百万元,投资回报周期通常为2-3年,较长的回报周期可能影响企业改造积极性。(2)标准化与模块化设计需求:不同行业、不同厂家的设备接口、数据格式不统一,导致节能系统难以兼容。例如物流AGV与自动化立体库来自不同厂商时,协同调度算法无法高效对接,需推动设备接口、能耗数据采集标准的统一,通过模块化设计降低系统集成难度,提升节能策略的通用性。(3)政策激励与碳交易机制衔接:目前部分地区对节能改造的补贴力度不足,且企业节能成果与碳交易市场衔接不紧密。需完善政策激励,如对采用超高效节能设备的企业给予税收减免,同时将设备节能带来的碳减排量纳入碳交易体系,让企业通过碳交易获得额外收益,激发改造动力。

3.3 未来发展趋势

(1)人工智能驱动的自适应节能系统:AI算法可实时学习设备运行数据与工况变化,自主优化节能策略。例如注塑机的AI系统能根据原料特性、产品规格动态调整参数,无需人工干预即可实现能耗最优,较传统控制节能率再提升5%-8%。(2)5G+工业互联网的远程能效优化:依托5G高带宽、低延迟特性,可实现跨厂区设备能效数据的实时传输与远程监控。运维人员通过工业互联网平台,能远程调整多工厂设备的节能参数,如统一调度不同厂区的AGV充电时间,提升整体能源利用效率。(3)氢能驱动机电设备的探索:氢能具有零碳排放、续航能力强的优势,未来可用于驱动大型机电设备,如物流园区的重型AGV、工厂的大功率电机。通过氢燃料电池与储能系统结合,解决氢能供应不稳定问题,推动机电设备向零碳能源驱动转型。

4 结束语

机电一体化设备节能策略是实现工业绿色发展的关键路径。通过深入剖析能耗机理,针对性地提出涵盖机械、电气、智能控制及系统级的多维度节能方案,并适配不同行业应用,能有效降低设备能耗、提升能源利用效率。尽管在实施过程中面临成本、标准化及政策激励等挑战,但随着技术进步、标准完善与政策支持,尤其是人工智能、5G等新兴技术的融合,机电一体化设备节能将迈向更高水平,为工业可持续发展与碳中和目标达成提供有力支撑。

[参考文献]

- [1]付杰.建筑电气设计中的节能技术措施分析[J].建材发展导向,2025,23(03):130-132.
- [2]陈丽芳.机电一体化技术的应用与发展综述[J].电子技术,2023,52(11):301-303.
- [3]乔淑梅.机电一体化技术的应用及其发展趋势分析[J].现代工业经济和信息化,2023,13(03):127-129.
- [4]汪涛,陶小培.机电一体化技术的应用与展望[J].电子技术,2023,52(03):57-58.